

現場計測의 虛와 實 (제2부 : 침하측정)

Fact and Fiction in Field Instrumentation(Part II : Settlement Measurement)

宋 定 洛, Song, Chung-Rak

(주)대우엔지니어링 지반공학부 과장, Manager, Geotech. Div. Daewoo Engineering Co., #275 Yangjae-Dong, Socho-Gu, Seoul, Korea (137-130)

SYNOPSIS

For the more meaningful settlement measurement, the correct understanding of the measuring mechanisms and precautions are necessary. This article investigated the main principles and error precautions of the frequent used settlement measuring systems

From the study, it was turned out that the screw type settlement measuring system is robust but it has high error susceptibility during construction work. Bore hole extensometer system does not have high error susceptibility during construction work but has soil-instrument interaction which may prohibit the accurate settlement measurement. Liquid settlement cell system is the most advanced and virtually free from most of the disadvantages of it predecessors but the mechanism and precautions are rather complex to understand.

1. 개 요

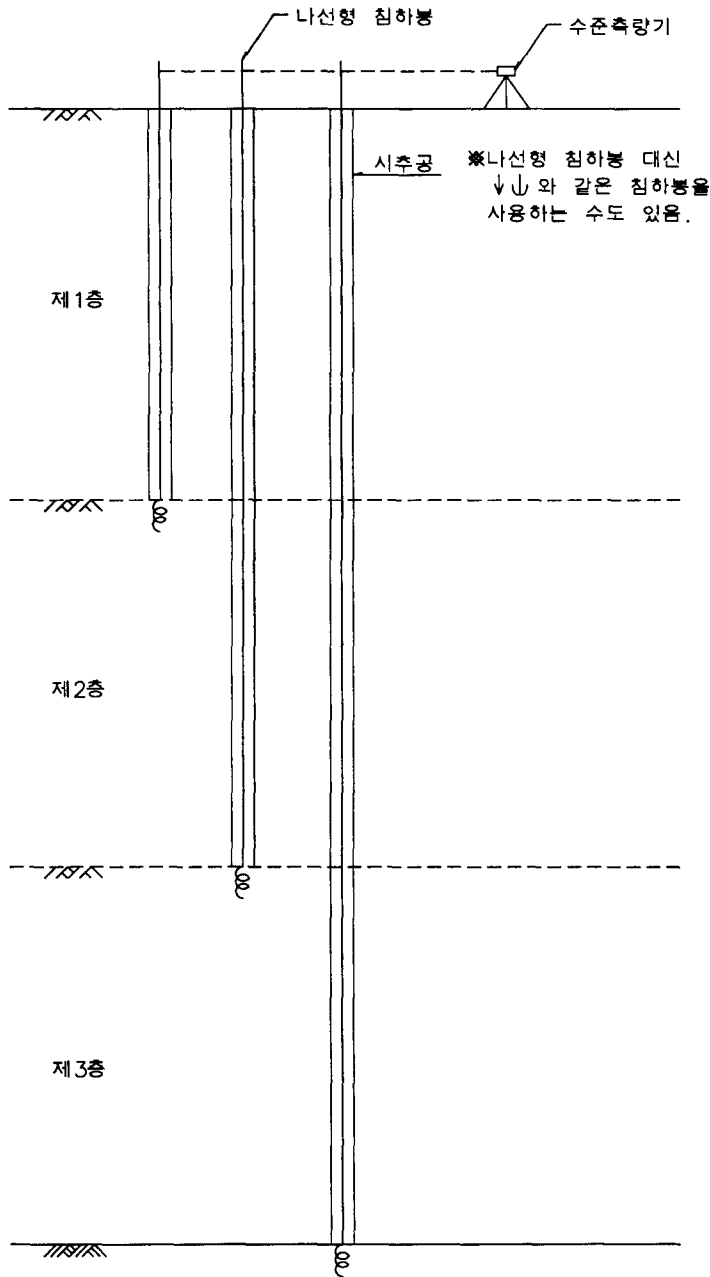
침하 측정은 토목현장에서 가장 많이 사용하는 계측항목의 하나이다. 과거부터 침하판 및 갈고리형 또는 나선형 침하봉 등에 대하여 수준측량을 실시하여 비교적 용이하게 침하측정을 하여왔다. 근래에는 지반내에 케이싱을 설치하고 케이싱 바깥쪽에 침하소자를 설치하여 특수한 센서에 의하여 침하를 측정하는 층별침하계도 사용되고 있다. 특히 일부 계측기 제조사들에서는 지반내부에 침하측정이 가능한 전기식 센서를 설치하고 케이블을 원거리까지 연장하여 원격측정이 가능토록 하는 액체침하계 등도 생산/공급하고 있다. 이러한 여러가지 침하측정 장치들은 계측기의 기계적 특성 및 설치 방법등에 따라 결과에 오차가 발생할 수 있다. 오차가 일정범위를 초과할 경우 부정확한 지반거동 파악을 초래할 수 있으며, 심한 경우는 지반거동을 잘못 파악하여 현장계측을 실시하지 않은 경우보다 더 혼란을 초래할 수 있다. 이러한 일들은 계측기의 특성과 지반의 특성을 충분히 감안하지 않고서 계측이 시행된 경우에 주로 나타난다고 할 수 있다. 보다 많은 경우 계측기의 특성을 충분히 이해하지 못하여 발생한다. 그러나 계측기의 원리 및 특성은 의외로 간단한 경우가 대부분이다.

본 고는 이러한 침하측정 장치들의 기본 원리와 실제 발생하는 문제점, 그리고 그 해결방안 등을 고찰 하고자 하였다.

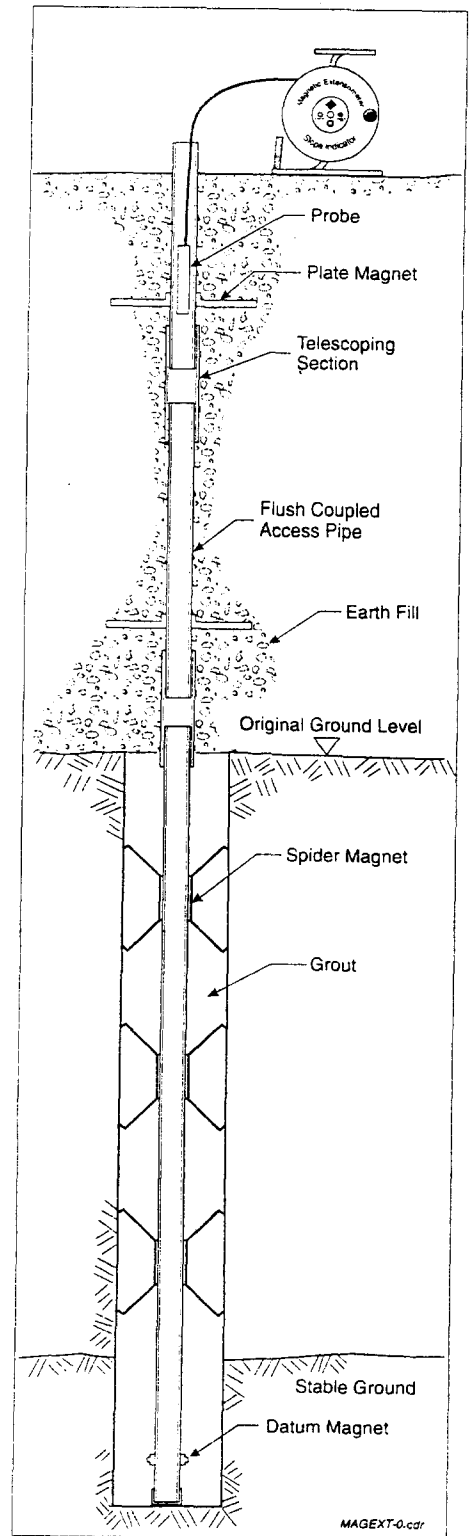
2. (층별) 침하계의 원리

2.1 갈고리 또는 나선형 침하봉

초기의 (층별) 침하 측정은 <그림 1>과 같이 끝부분을 갈고리 또는 나선형으로 가공한 침하봉을 층별로 설치하고 수준 측량에 의하여 그 침하를 측정하는 방법을 사용하여 왔다. 표면 침하측정의 경우는 갈고리 또는 나선형 끝부분 대신에 철판을 설치하고 그 위에 강봉을 설치하여 침하를 측정하여 왔다.



<그림 1> 갈고리 또는 나선형 침하봉에 의한 층별침하 측정

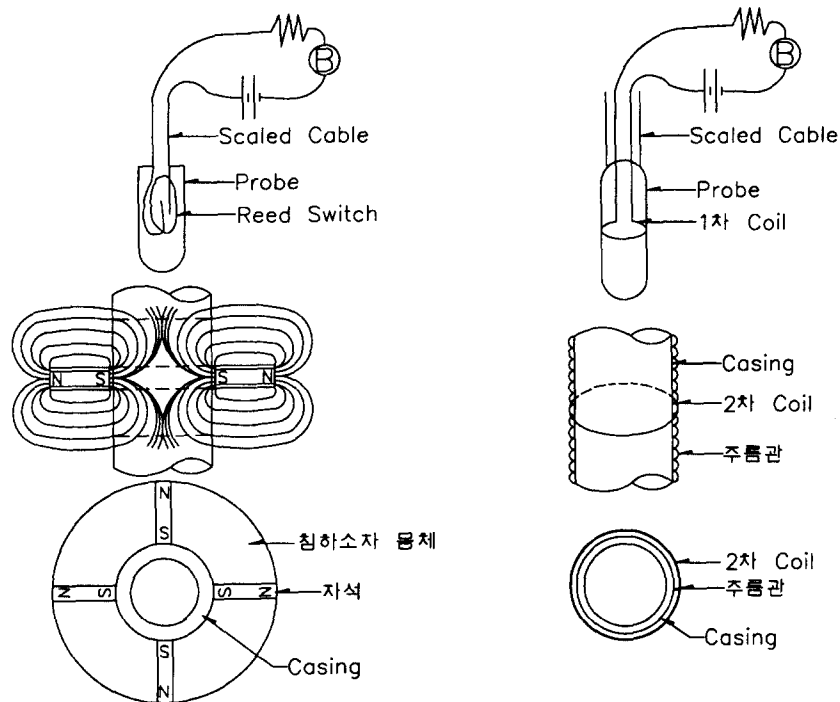


<그림 2> Bore Hole Extensometer에 의한 층별 침하측정 (SINCO, 1989)

2.2 Bore Hole Extensometer 형식 층별 침하계

<그림 1>의 방법은 여러층의 침하 측정을 위하여 시추공을 여러개 형성하여야 하며 측정시에도 함척을 여러면 옮겨가며 수직측량을 수행하여야 하는 번거로움이 있다. 그러나 비교적 근래에 개발된 Bore Hole Extensometer 형식의 층별 침하계는 <그림 2>와 같은 원리를 이용하여 1개의 공내에서 측정을 수행할 수 있다. 또한 측정장비의 취급이 용이하여 경제 적이며 측정과정이 번거롭지 않다는 장점이 있어 근래에는 <그림 1>의 갈고리 또는 나선형 침하봉 방식보다 널리 쓰이고 있다. 특히 갈고리 또는 나선형 침하봉의 경우 시공중 관의 이음에 따른 오차로 인하여 시공중 측량성과의 정밀도가 현저히 저하되는 문제가 발생하는 경우가 있으나, Bore Hole Extensometer 의 경우 시공중 케이싱의 이음에 대하여도 측정성과가 실질적인 영향을 받지 않는 장점이 있다.

Bore Hole Extensometer에는 Bellow - Hose Gage, Magnetostrictive Gage등도 있으나, 본 고에서는 <그림 3>과 같이 국내에서 비교적 많이 쓰이고 있는 Magnet - Reed Switch 방식 및 Current - Displacement Induction Coil 방식에 대하여 살펴 본다.



(a) Magnet-Reed Switch 방식 (Hanna, 1985)

(b) Current - Displacement Induction Coil 방식

<그림 3> Bore Hole Extensometer Type 층별 침하계 (Soil Instrument)

<그림 3>의 원리는 다음과 같다.

- 시추공내에 P.V.C등으로 된 케이싱을 설치하고 그 외부의 임의의 위치에 자석 또는 금속 Ring으로 된 침하소자를 설치한다.
- 케이싱과 보링공 사이를 충전하여 설치를 완료한다.

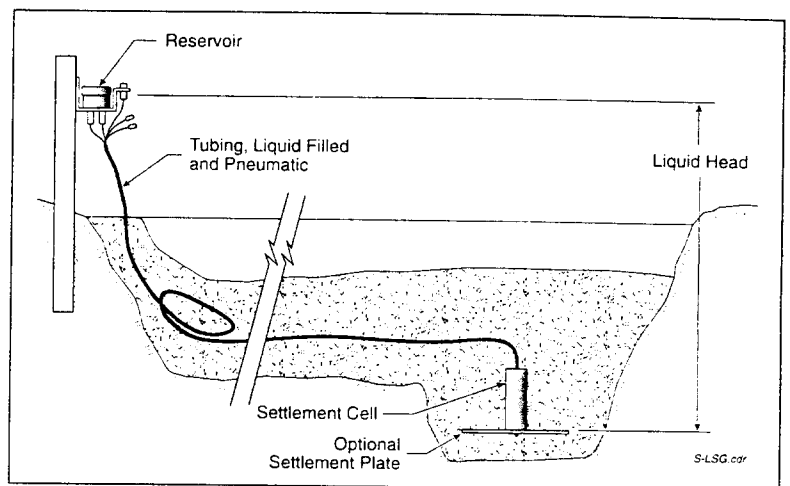
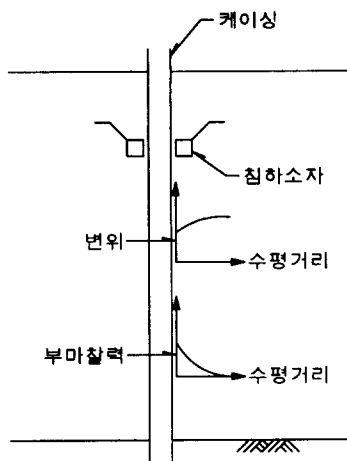
- 눈금이 표시된 케이블에 연결된 프로우브를 케이싱내에 삽입하여 침하소자의 위치에 도달하면 측정기에서 부자가 울린다.
- 이때의 케이블 눈금을 읽고 고정점과 침하소자 사이의 거리를 초기치와 비교하여 수직변위를 계산한다.

<그림 3>에서 측정용 센서는 크게 <그림 3-a>와 같은 Magnet - Reed Switch 방식 및 <그림 3-b>와 같은 Current - Displacement Induction Coil 방식이 있다. <그림 3-a>와 같은 Magnet - Reed Switch 방식은 자석을 이용하여 만든 침하소자를 이용한다. 따라서 침하소자 내부에는 <그림 3-a>의 중앙부와 같이 자장이 형성된다. 이 자장내에 <그림 3-a>의 상부와 같은 Reed Switch를 내장한 프로우브가 삽입되면 전기회로가 연결되게 된다. 전기회로가 연결되면 측정기에서 부자가 울리거나 LED가 켜지게 되며, 이때 줄자의 눈금을 읽으면 된다.

<그림 3-b>와 같은 유도전류 방식은 지중에 매설되는 침하소자가 유도전류 코일의 2차 코일 역할을 하는 도전체 Ring으로 만들어져 있다. 2차 코일 Ring내에 1차 코일을 가진 프로우브가 삽입되면 2차 코일에 유도 전류가 발생하며, 2차 코일의 유도전류의 영향으로 1차 코일의 유도전류 값이 변화하게 된다 (Audio Amplifier 에서의 Damping 과 유사). 이러한 관계로 1차 코일에 유도되는 전류는 1차 코일이 2차 코일의 중앙에 있을때 가장 크게 된다. 이때 측정기에 전류계를 부착하고 전류가 최대일때의 줄자눈금을 읽으면 침하소자의 위치를 알 수 있다.

2.3 액체 침하계

침하봉 및 Bore Hole Extensometer 형식의 침하측정은 땅속에 강성 케이싱을 설치하고 각각 그 주변의 침하를 측정하는 방식으로서 <그림 4.a>와 같이 매설된 케이싱과 지반의 상호간섭(interaction)에 의하여 정확한 침하계측이 어려울 수 있다. 이와 같은 바람직하지 못한 현상을 극복하기 위하여 근래에는 <그림 4.b>와 같은 액체 침하계가 사용되고 있다. 액체 침하계는 침하의 정도를 <그림 4.b>와 같은 수두 차이로 파악한다. 또한 액체 침하계는 시공중 시공장비의 활동성을 제약하지 않으므로 시공성 측면에서도 매우 우수하다.



(a) Bore-Hole Extensometer 의 케이싱-지반 상호간섭 (b) 계측기-지반 상호간섭이 최소화되는 액체 침하계의 구조(SINCO, 1994)

<그림 4> 액체 침하계

즉 액체 침하계는 지반내에 딱딱한 케이싱을 설치하는 것이 아니고 부드러운 튜브 및 전기 케이블이 센서에 연결되므로 계측기와 지반의 상호간섭을 거의 무시할 수 있는 장점이 있다.

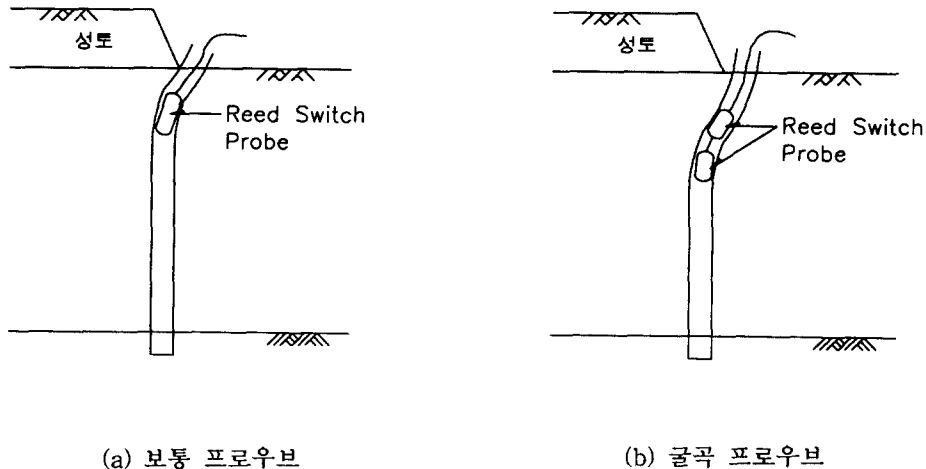
3. 범하기 쉬운 오류 및 대책

3.1 센서

가. Magnet-Reed Switch 방식

<그림 3-a>에서 Reed Switch는 어느 특정한 크기의 자장에서만 작동하는 것이 아니고 Reed Switch 가 붙을 정도의 일정수준 이상의 자장에서는 항상 작동하므로 측정기는 어느 범위 안에서는 부자 소리를 지속적으로 발생한다. 따라서 Magnet - Reed Switch 방식에서는 Reed Switch가 침하소자의 자장내에 들어가기 시작하거나 나오기 직전에 측정하는 것이 일반적이다.

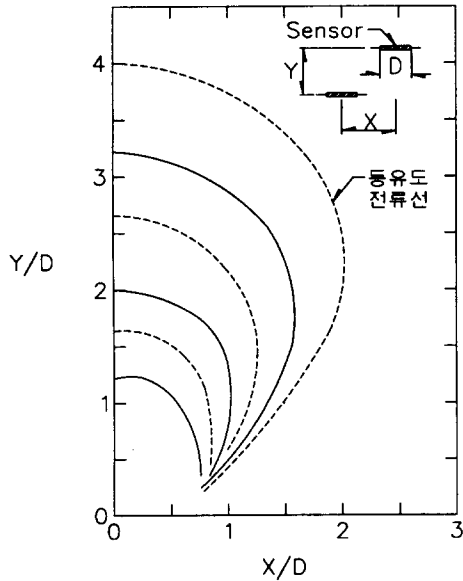
또한 <그림 3-a>는 케이싱내부 Reed Switch의 수평적 위치에 따라서도 자장의 크기가 달라지게 되므로 측정 오차가 발생할 수 있음을 보여 준다. 특히 침하소자에 사용된 자석의 세기가 충분치 않을 때는 Reed Switch 의 수평적 위치에 따라 침하소자가 감지되지 않을 수도 있다. 이러한 오차는 케이싱의 내경에 맞추어 프로우브를 되도록 굽게 함으로서 줄일 수 있다. 그러나 프로우브가 굽을 경우 케이싱이 휘었을때 흰 부분을 통과하지 못하는 경우도 있으므로 프로우브가 너무 굽지 않아야 한다. 최근 일부 계측기 제조사에서는 프로우브가 굽으면서도 흰 부분을 쉽게 통과 할 수 있도록 <그림 5>와 같은 굴곡형 프로우브도 소개하고 있다.



<그림 5> 굴곡형 Reed Switch 프로우브

또한 <그림 3-a>의 줄자의 신축에 의하여도 오차가 발생할 수 있다. Smith and Burland(1976)에 의하면 정상적인 Magnet-Reed Switch 방식의 경우 ± 1.0 mm 정도의 정밀도를 얻을 수 있다고 보고하고 있다. 따라서 본 방법의 정밀도 자체는 보통 지반공학에서 필요한 정밀도를 가지고 있다고 볼 수 있다. 그러나 보다 높은 정밀도가 필요할 경우에는 줄자대신 봉(Bar)과 Micrometer를 사용하는 방식등의 개선된 시스템을 사용할 수 있다.

나. Current-Displacement Induction Coil 방식



<그림 3-b>에서 1차 Coil을 내재한 센서는 유도전류가 최대가 되는 지점(2차 Coil의 중앙)에서 측정치가 읽히지므로 침하소자의 구조가 단순해지는 장점이 있다. 본 방식의 경우 2차 Coil 내부에서의 1차 Coil (센서)의 수평위치에 따라서 오차가 발생할 수 있는 가능성에 대한 의문이 있을 수 있다. <그림 6>은 유도전류 방식의 경우 1차 코일과 2차 코일의 수평거리에 따라 어느정도 오차가 발생할 수 있음을 보여준다. 그러나 Bore Hole Extensometer에 사용되는 유도코일의 경우 1차 코일이 2차 코일 내부에 위치하므로 <그림 6>에서 $X=0$ 이 된다. 따라서 케이싱내 센서의 수평위치에 의한 오차는 거의 없다고 할 수 있다.

<그림 6> 동일한 유도전류치가 얻어지는 수평, 수직 변위 (Seling and Grangaard, 1970)

다. 액체 침하계 방식

액체 침하계에서 침하를 측정하는 센서는 간극수압계이다. Bore Hole Extensometer 방식과 달리 센서가 직접 땅속에 매설되어 있다. 따라서 사용중 센서의 손상 가능성은 매우 적다. 그러나 진동현식 간극수압계를 사용할 경우 간극수압계에 공급되는 전류가 너무 크지 않도록 조심하여야 한다.

진동현식 간극수압계의 경우 측정기에서 얻어진 일정한 크기의 전류를 간극수압계 내부의 Coil에 공급하고 이때 진동현의 반응을 측정하는 것이다. 대부분의 경우 센서와 동일 메이커에서 제작된 측정기를 사용하므로 문제가 없으나, 센서와 측정기를 다른 메이커 제품을 사용할 경우 신중한 검토가 필요하다.

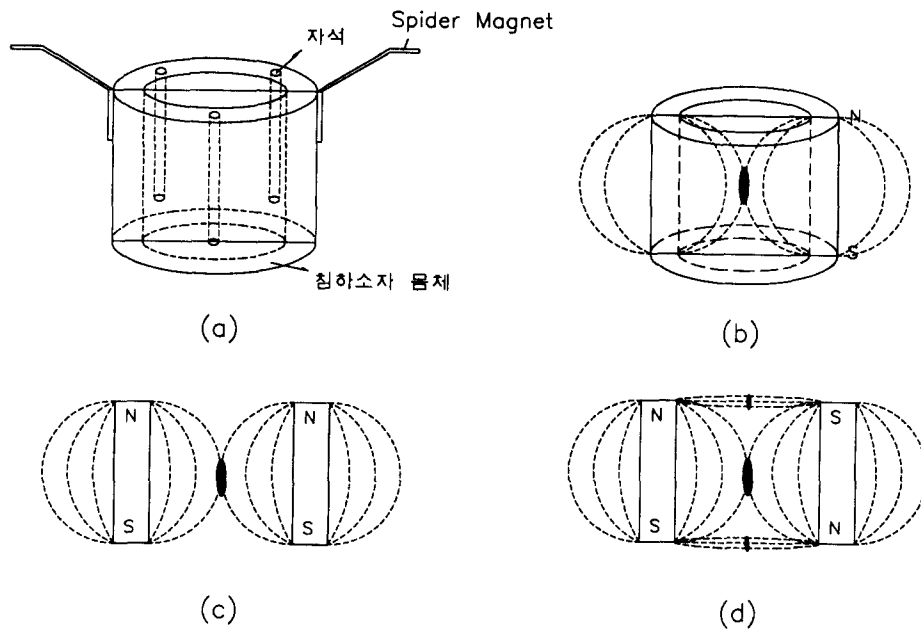
진동현식 간극수압계를 사용할 경우, 센서에 허용범위 이상의 전류가 공급될 경우 현에 작용하는 진동의 세기가 달라져 Calibration Factor의 유효 여부가 문제될 수 있고, 심한 경우 현을 영구적으로 손상시킬 수 있다. 따라서 센서와 측정기는 호환성 여부를 사전에 확인하여야 한다.

3.2 침하소자

가. Magnet - Reed Switch 방식

- 자석의 배치 및 종류

<그림 3-a>의 하부는 Magnet - Reed Switch 방식의 침하소자를 나타내고 있으며, 자석은 침하소자 몸체에 N-S 극을 수평으로 90° 간격으로 4개 설치하는 방식을 취하고 있다. 그러나 제작사에 따라서는 <그림 7.a>와 같이 침하소자 몸체에 수직으로 설치하는 방식을 채택하고 있는 경우도 있다. <그림 7.a>와 같이 3개의 자석을 이용한 침하소자는 국내에서도 생산되고 있다.



<그림 7> Magnet - Reed Switch용 침하소자 II

<그림 7>과 같은 침하소자는 본래 <그림 7-b>와 같이 1 개의 큰 Ring 자석을 배치하여 일정수준 이상의 자기장이 형성되는 부위가 1개소로서 Reed Switch가 침하소자를 통과할때 부자소리가 1번만 울리도록 제작되었다.

그런데 일부 제품중에서는 자석의 극 표정을 동일한 방향으로 맞추지 않고 임의 배치된 경우가 더러 있다. 즉 1 쌍의 자석이 <그림 7-c>와 같이 배치되어 있다면 나머지 1 쌍의 자석은 <그림 7-d>와 같은 극표정 상태가 되어 <그림 7-d>와 같은 혼합 자장이 형성된다. 따라서 침하소자의 중앙부에서는 <그림 7-c>와 <그림 7-d>의 자장이 복합되어 있는 복잡한 상태가 된다. 이런 경우 침하소자 속으로 Reed Switch를 집어넣으면 Reed Switch의 Reed 방향에 따라 부자가 1번 ~ 3번 임의적으로 울린다. 특히 시간에 따라 자력이 약해지면 처음에 3번 나던 소리가 2번 또는 1번만 나게 되는 경우도 발생한다. 따라서 침하소자를 사용할 경우에는 반드시 자석의 극표정을 통일시킨 것을 사용하여야 한다.

자석을 이용한 침하소자의 경우 과업기간 동안 자석의 세기가 일정한 수준이상을 유지하여야 한다. 해안지역의 경우 시간이 경과함에 따라 침하소자가 감지되지 못하는 경우가 종종 있는데, 이는 지반내부에서 자석의 세기가 줄어들기 때문으로 판단된다. 자석의 세기를 유지시키기 위하여 계측기 제작사마다 방법을 약간씩 달리하고 있는데, SOIL INSTRUMENT 사에서는 비교적 큰 Ring 자석을 사용하고 (그림 7-b참조), SINCO 사에서는 작은 자석을 12개씩 사용한다. 국내 생산품은 작은 자석 3개를 사용한 제품들이 주류를 이루는데, 자석수를 보다 늘리는 것이 신뢰도 및 내구성 측면에서 양호하리라 판단된다.

자석의 종류는 크게 Ferrite 자석과 Al-Ni-Co(Aluminum - Nickel - Cobalt 합금) 자석이 있다. Ferrite 자석은 육안으로 볼때 돌처럼 보이는 자석이며 Al-Ni-Co 자석은 금속성을 느낄 수 있는 자석이다. 최근 강력한 Ferrite 자석을 만들 수 있는 기술이 개발되었다고 알려져 있으나 일반적으로 Al-Ni-Co 자석이 보다 강력하다. 그러나 Al-Ni-Co 자석의 원료중의 하나인 Cobalt가 특정지역에서만 생산되는 관계로 Al-Ni-Co 자석은 일반적으로 비용이 다소 비싸다. 그러나 자석의 단가가 침하소자의 단가에 미치는 영향이 크지 않은 만큼, 되도록 강력한 자석을 여러개 박아 넣은 침하소자를 사용하는 것이 바람직하다. 최근 일본에서는 고무 자석이라고 하여 굴곡성이 좋은 판상 자석을 Current-Displacement Induction Coil 방식의 침하소자 처럼 주름 튜브의 외측에 감아서 사용하는 경우도 있다 (TOYOKO ELMES, 1996). 이와 같은 형

식은 대형의 자석을 사용하여 침하소자용 자석의 장기적 안정성을 향상시키는 방안의 하나일 것이다.

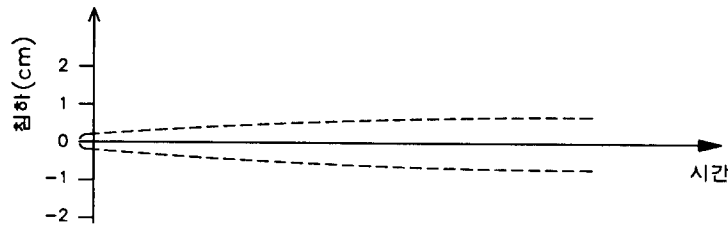
- 거미발의 종류

침하소자에 부착되어 있는 거미발(Spider Foot)은 Aluminum Rivet을 이용하여 침하소자 몸체에 부착하는 경우가 많으나 Aluminum은 해수등에서 부식되는 일이 많으므로 해수조건등에서는 구리 리벳을 사용하든가 알루미늄 이외의 나사등을 사용하는 것이 바람직하다.

일부 국내제품의 경우 반발력이 매우 약한 고무나 플라스틱으로 거미발을 만드는 경우가 있는데, 거미발의 역할이 침하소자가 지중에 고정될 수 있도록 하는 앵커 역할이라는 것을 고려하면 고무나 플라스틱 거미발은 넌센스임을 알 수 있다. (침하소자 제품중에는 공기압을 이용하여 화살촉 처럼 생긴 앵커를 지중에 삽입하도록 하는 방식을 취한것도 있다.) 따라서 거미발은 반드시 반발력이 좋은 스프링강으로 만들어야 한다.

- 고정점의 이동

Bore Hole Extensometer는 가장 하부에 고정점을 설치하여 <그림 1>의 나선형 침하봉과 같은 별도의 고정점(Bench Mark) 없이 침하량을 측정하는 장점이 있다. 고정점은 그 측정공의 모든 침하소자의 기준이 되는 점으로서 침하소자와 고정점과의 상대거리를 초기치와 비교하여 침하 또는 용기를 측정하게 된다. 따라서 고정점은 움직임이 없도록 설치되어야 한다. 그러나 실제로 <그림 8>과 같이 고정점이 움직이는 결과들이 보고되기도 한다.



<그림 8> 시간에 따른 고정점의 궤적

고정점이 움직이게 되면 (불안정하게 되면) 그 측정공의 결과 전체에 대한 신뢰도가 저하되게 되므로 고정점의 움직임에 대하여는 반드시 그 이유를 규명하여야 한다. 고정점 불안정의 가능한 요인들은 다음과 같다.

- ① 고정점과 케이싱의 접촉불량
- ② 고정점 주위 시멘트 그라우팅의 불량
- ③ 고정점 설치시 시추공 바닥의 슬라임 제거 불량

상기와 같은 요인들은 단독 또는 복합적으로 작용할 수 있다. ①의 경우는 비교적 설치 초기에 소량의 침하 또는 용기가 발생하고 곧 안정되는 특징으로 나타난다. ②,③는 고정점 부근이 전반적으로 불안정한 상태를 나타내므로 비교적 오랜기간 동안 침하 또는 용기를 나타낸다.

상기의 문제점들에 대한 대책으로서 일반적으로 알려진 바는 없으나 현장 기술자들의 경험들을 종합하면 다음과 같다.

① 고정점과 케이싱의 접촉불량 대책

일반적으로 고정점과 케이싱을 접촉하는 방식은 본드 등의 접착제와 접착 테이프를 사용한다. 그러나 현장에서 토사 및,

물, 기름 등 이물질이 케이싱에 부착되어 접착제 등의 성능이 저하되는 경우가 많다. 또한 접착제가 경화되기 전에 시추공 내부로 케이싱을 삽입하여야 하는 일이 많아 접착제의 신뢰도를 더욱 저하시킨다. 따라서 접착제 보다는 나사못 및 조임쇠(Clamp) 등을 이용하여 고정점과 케이싱을 접착하는 것이 바람직하다.

② 고정점 주위 시멘트 그라우팅의 불량 대책

고정점 주위의 시멘트 그라우팅은 시추기술자들의 경험에 의하여 물, 시멘트, 벤토나이트 등을 배합하여 사용하는 것이 일반적이나 필요한 시간에 그라우팅 재료가 경화하는 것을 보장하기가 어렵다. 그러나 고정점 주위에는 조강재를 혼합하여 신속한 응고가 발생하도록 하는 것이 고정점의 신뢰도 및 설치작업의 편의성 측면에서 바람직하다 (고정점 부근이 응고된 뒤에는 케이싱의 부상방지를 위하여 사람이 케이싱을 잡고 있지 않아도 됨). 이때 물, 시멘트, 벤토나이트, 조강재의 혼합 비율은 현장에서 (간이)시험배합을 통하여 쉽게 확인할 수 있다.

③ 고정점 설치시 시추공 바닥의 슬라임 제거 불량

대부분의 경우 계측기 설치를 위한 시추공 천공후 깨끗한 물을 이용하여 바닥에 침전된 슬라임을 제거하는 과정을 거친다. 그러나 공벽 보호용 케이싱을 설치하지 않은 상태에서는 청소과정에서 공벽의 붕괴 또는 계측기 설치 지점 주변의 교란을 유발할 수 있으므로 충분한 청소가 어려운 실정이다. 따라서 바닥 슬라임의 청소가 필요한 계측기 설치공의 경우 충분한 청소가 가능하도록 반드시 공벽 보호용 케이싱을 설치할 필요가 있다.

그러나 층별침하게 설치후 고정점의 미세한 움직임(1cm 내외), 설치후 되메움 및 Grouting 재의 안정화 또는 경화과정에 기인할 수 있으므로 그 양이 크지 않은 경우는 문제되지 않는다.

- 침하소자의 미끄러짐 또는 고착

지중에 설치된 침하소자는 지반의 침하 및 용기등 지반과 함께 거동하여야 한다. 그러나 침하소자 주위의 되메움이 충분히 잘 되지 않았거나, 또는 침하소자가 케이싱에 꽂히어 고정되어 버린 경우에는 급작스런 침하 또는 침하가 전혀 발생하지 않은 현상들이 발생한다. 경우에 따라 상부의 침하량이 하부의 침하량보다 작은 경우가 있는데, 이러한 현상 또한 실제 지반의 거동이라기 보다는 침하소자의 미끄러짐 또는 고착등이 원인일 것으로 판단된다.

이러한 현상들은 주로 다음과 같은 요인들에 의하여 발생하며, 어느 경우이든 결과의 보정 및 보수가 불가능하므로 가능한 빨리 재설치 하여야 한다.

① 침하소자 미끄러짐의 요인

- 침하소자 주변 되메우기 불량
- 시추공에 비교하여 침하소자의 Spider가 충분히 크지 않음

② 침하소자 고착의 요인

- 침하소자를 결속한 실이 안풀어짐
- 침하소자와 케이싱 사이의 틈새에 모래등이 끼임

상기와 같은 문제를 예방하기 위하여는 설치시 다음과 같은 조치를 취하여야 한다.

① 침하소자 미끄러짐에 대한 대책

침하소자 주변 되메우기는 층별 침하계가 설치된 시추공 내에 벤토나이트 알맹이를 지상에서 던져 넣어 메우거나 Tremie Pipe를 이용하여 아래로 부터 위로 그라우팅 하여 되메움 한다. 이때 벤토나이트 알맹이를 던져 넣는 방식은 충분한 시간을 가지고 서서히 넣어야 한다. 급하게 할 경우 벤토나이트 알맹이들이 목표지점까지 도달하지 않고 도중에서

시추공을 막게 되어 효과적인 되메우기를 곤란하게 한다. 이때 벤토나이트 알갱이들은 완전히 말린것을 사용하여 수중에서 팽창성이 좋도록 한다 (송정락, 1995). 특히 기상여건 등 시공환경이 좋지 않은 경우는 본능적으로 서두르기(굵은 알갱이를 사용하는 등)를 하게 되므로 정밀시공이 곤란하게 된다.

되메우기로서 Tremie Tube 를 사용한 그라우팅 사용은 벤토나이트 알갱이를 사용하는 방법보다 시공의 신뢰도 측면에서 양호하나 이때에는 그 배합비에 주의하여야 한다. 현장에 따라서는 시추공 붕괴 방지용으로 사용하는 벤토나이트 안정액 정도의 농도로써 벤토나이트 그라우팅을 하는 경우가 있는데 이러한 배합비는 전적으로 잘못된 것이다. 이러한 배합비로 그라우팅을 할 경우 하루 또는 이틀 정도의 시간이 경과된 후에는 벤토나이트 입자들은 아래로 침전되고 상부에는 물만 남아있는 현상을 관측할 수 있으며, 설치된 침하소자가 수십 cm 또는 수 m 이동되어 있는 상태가 관측되기도 한다. 층별침하계 설치용 되메움재료로서의 벤토나이트 혼합체는 공벽 유지용 액체가 아니고, 주변 지반과 유사한 상태의 지반을 만들어주는 것이다. 따라서 펌핑이 가능한한 최대한 걸쭉한 상태로써 그라우팅을 하여야 한다. 가장 이상적인 경우는 되메움 재료 반죽시 원지반과 성질이 유사할 수 있도록 벤토나이트, 시멘트, 물등을 혼합하는 것이다. Easton(1984)은 물: 시멘트: 벤토나이트 = 1: 0.15: 0.06 (무게비) 를 추천하고 있다. 그러나 실제 시험 배합을 해보는 것이 가장 바람직 하다.

침하소자의 크기는 층별 침하계 설치용 시추공의 크기에 따라 구분되어 적용되며, 일반적으로 침하소자의 몸체직경은 시추공 직경보다 작고, 거미발을 포함한 직경은 시추공의 직경보다 크다. 그러나 공벽 유지용 케이싱을 사용하지 않을 경우 시추공의 직경은 시추공의 공칭 직경보다 현저히 커지는 경우가 있다. 이 경우를 위하여 침하소자의 거미발을 충분한 크게 사용하여 되메우기의 신뢰도가 다소 저하되는 경우에도 침하소자의 미끄러짐등이 발생하지 않도록 하는 것이 바람직 하다.

② 침하소자 고착에 대한 대책

침하소자의 설치 방법은 여러가지가 있으나, 본 고에서는 국내에서 주로 많이 사용하고 있는 방식에 대하여 검토한다. 침하소자의 거미발을 실로 묶고 시추공내에 삽입한후 실을 당겨서 거미발을 원래대로 팽창시키는 경우, 사용하는 실에 따라서 거미발의 팽창여부에 대한 신뢰도가 상당히 달라질 수 있다. 일반적으로 많이 사용하는 실은 뉴시줄이다. 즉 뉴시줄로 침하소자의 거미발을 묶고 지상에서 줄을 잡아당겨 묶인 줄을 푸는 방식을 사용한다. 뉴시줄은 인장강도가 크고, 매끄러워 침하소자를 지중에 설치후 지표에서 잡아당겼을 때 대부분 성공한다. 그러나 어떤 경우에는 줄의 강도를 높이기 위하여 나일론 줄(붉은색 빨래줄)을 사용하기도 하는 데 나일론 줄은 표면에 요철이 있어 지중에 들어간 후 토립자가 줄 표면의 요철에 달라 붙은 경우에는 표면이 매끄럽지 못하여 지상에서 줄을 잡아당겼을 때 거미발을 묶고 있는 부분이 풀어지지 않는 경우가 많이 발생한다. 따라서 이러한 나일론 줄의 사용은 지양하는 것이 바람직하다.

현장에 따라 침하소자를 설치하고 공벽이 안정된 후 거미발을 묶고 있던 줄을 푸는 경우가 있다. 해안가에서 이러한 방법을 적용할 경우 2 - 3 일 정도만 경과된 후에 거미발을 풀려고 하여도 줄이 떨어져 버리는 경우가 매우 많다. 층별 침하계 설치 지점 주변에 방치된 나일론 줄을 수거하여(2~3일 경과된 상태) 조사한 결과 사람의 힘으로도 줄이 쉽게 끊어질 정도로 성능이 열화된 것을 관측할 수 있다. 이러한 현상의 사유는 밝혀진바 없으나, 해안가 지역에서 침하소자 설치 후 수일 후에 줄을 당겨서 거미발을 팽창시키는 방식은 지양하는 것이 바람직하다.

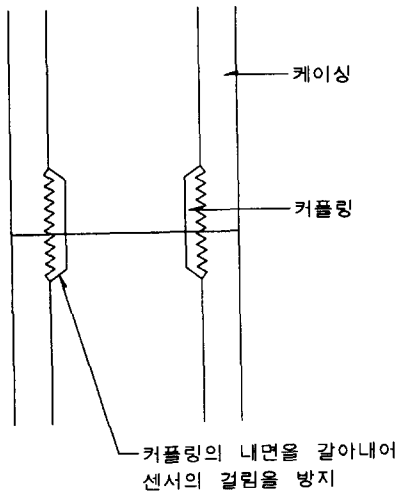
침하소자와 케이싱 사이에 모래등이 끼일 경우를 방지하기 위하여는 되도록 작업지역 주변에 모래가 없도록 하여야 하며, 침하소자 설치전 반드시 케이싱과 침하소자에 대한 청소를 하여주는 것이 바람직하다. 또한 침하소자의 안쪽에 윤활용 그리이스를 듬뿍 칠하여 주는 것도 도움이 될 것이다.

- 커플링

층별침하계용 케이싱은 3~4m 길이로 생산된 것을 연장하여 사용하므로 연결용 커플링이 필요하게 된다. 커플링은 연결

위치에 따라 케이싱 내부로 연결하는 방식과 케이싱 외부로 연결하는 방식이 있으며, 나사 유무에 따라 나사식과 비 나사식이 있으며 재질에 따라 금속식과 비 금속식이 있다.

내부로 연결하는 방식은 케이싱 전체 길이에 걸쳐 외부 돌출부위를 형성하지 않으므로, 침하소자 설치시 밀어넣기 방법을 사용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 케이싱 내부에 돌출부위를 형성하여 측정시 센서가 커플링에 걸리는 일이 종종 발생하며 이로 인하여 전선 및 프로우브와 전선 접합부의 Sealing이 손상되는 일이 발생하기도 한다. 외부로 연결하는 방식은 케이싱 전체 길이에 걸쳐 외부 돌출부위를 형성하므로, 침하소자 설치시 밀어넣기 방법을 사용할 수 없으며 지표에서부터 사전 예정된 위치에 침하소자를 부착하여 설치하여야 하는 단점이 있다. 그러나 내부로 연결하는 방식의 경우 커플링을 <그림 7>과 같이 개선하여 센서의 손상을 방지할 수 있다.



나사식 커플링과 비 나사식 커플링의 차이는 커플링 부위의 신뢰성이다. 일반적인 신뢰성은 나사식이 양호하다. 그러나 나사식의 경우 케이싱을 깎아내야 하므로 가공부위가 약해지는 문제가 있을 수 있다. 그러나 이러한 문제는 커플링을 한 후 케이싱을 변형시키거나 흔들어 봐서 커플링의 건전성 유무를 확인할 수 있다. 나사식 커플링이 특히 우수한 효과를 발휘하는 경우는 진동등을 받을 경우이다 진동을 받을때 나사식 커플링은 비 나사식 커플링보다 매우 우수하다. 연약점성토 개량의 경우 수직 배수재가 타설 되는데 이 경우 상당한 진동이 지반에 전달된다. 이때 나사식 커플링은 비 나사식 커플링 보다 내구성이 뛰어나다.

금속식 커플링과 비금속식 커플링의 차이 또한 커플링의 신뢰성이다. 일반적인 신뢰성은 금속식 커플링이 유리하다. 단 부식에 대한 대책을 위하여는 황동등 부식에 강한 재질을 사용하는 것이 바람직하다. 비 금속식의 경우도 신뢰도는 금속식보

<그림 7> 내부 커플링의 개선

다 떨어지나 현장에서 사용되어 양호한 결과를 가져온 경우가 있다. 따라서 금속식 및 비 금속식의 구별보다는 커플링의 길이를 조금길게 안전측으로 쓰는것이 바람직하다. 커플링에 대한 검토결과를 요약하면 가장 바람직한 것은 금속식 + 나사식 + 내부방식 이나 비 금속식 + 나사식 + 내부 방식도 잘 쓰일 수 있다.

커플링에 관계하여 많은 경우 간과되고 있는 사항중의 하나가 침하에 대한 커플링의 저항성이다. 침하가 많을 경우 커플링에 작용하는 부 마찰력으로 인하여 커플링에는 상당한 힘이 작용할 수 있다. 케이싱은 강성 재질이므로 커플링이 이러한 침하를 어느정도 소화해 주는 것이 필요하다. 이러한 목적으로 외국 계측기 제작사들에서는 연성 커플링 및 Telescopic 커플링을 개발 공급하고 있으나 국내에서는 아직 널리 쓰이지 않고 있다.

- 케이싱의 종류

층별 침하계는 일반적으로 PVC 케이싱을 사용하며, 침하소자가 지반과 함께 케이싱 주위를 미끄러져 내린다고 가정한다. 따라서 케이싱을 선정할때는 이러한 조건이 최대한 만족되도록 하여야 한다. 이러한 조건들이 충분히 만족되지 않을 경우 케이싱과 지반사이의 상호간섭에 의하여 측정된 침하량이 실제 침하량과 달라질 수 있다. 현장의 기술자들에 따라서는 본 고에서 다루는 층별 침하계들에 대하여 회의적인 경우도 있는데, 현장에 적합치 않은 케이싱 사용등에 의하여 신뢰도 있는 계측에 실패한 적이 있기 때문으로 판단된다. 즉 케이싱과 지반사이의 상호간섭이 침하에 영향을 주는 정도를 충분한 수준으로 감소시키지 못한 때문으로 판단된다. 그러나 세계적인 계측기 회사들의 대부분이 이러한 종류의 층별침

하계를 생산하고 있는 사실은 간접적이거나 본 방식의 신뢰도가 비교적 양호함을 나타내는 것으로 판단된다.

일반적으로 알려져 있는 케이싱의 종류는 다음과 같다.

<표 1> 층별 침하계 케이싱의 종류 (자석 - 리드 스위치 방식)

구 분	내 관	외 관	침하소작 고정방식
예상 침하 < 1%	PVC 관 + 일반 Coupling	없음	거미 자석 (거미발 3 개)
큰 침하	PVC 관 + Telescopic Coupling	없음	공기압을 이용한 화살촉 Anchor
큰 침하	PVC 관 + 일반 Coupling	주름관	거미 자석 (거미발 6 개)
압 반	PVC 관 + 일반 Coupling	없음	거미 자석 (거미발 3 개)

* 본 표는 국내에서 보다 많이 사용되고 있는 자석 - 리드 스위치 방식에 대한 것이며, Current Displacement Induction Coil 방식의 경우는 Dunicliff (1988) 참조.

<표 1>은 자석-리드 스위치 방식 층별 침하계에 사용하는 케이싱은 목적에 따라 여러가지를 조합하여 사용할 수 있음을 나타낸다. 즉 지반에서 예상되는 침하량에 따라 적절한 케이싱을 사용하여 케이싱과 지반의 상호간섭을 최소화 하는 것이 바람직하다. 초기 우리나라에서는 PVC 관 + 일반 커플링 을 사용한 내관만을 사용한 경우가 많았는데 이는 해안 매립과 같이 예상 침하량이 1 % (10 m 두께일 때 10 cm) 를 초과하는 경우등에는 적합치 않을 가능성이 있음을 나타낸다. 따라서 케이싱과 지반의 상호간섭을 최소화 하기 위하여는 <표 1>을 고려한 적절한 케이싱 선정이 이루어 져야 할 것이다.

나. Current - Displacement Induction Coil 방식

이 방식의 센서는 침하소자로(2 차 코일)로서 금속띠를 사용한다. 대개의 경우 부식을 방지하기 위하여 스테인레스-스티일로 제작한다. 따라서 침하소자 자체에서 문제가 발생하는 경우는 거의 없다. 케이싱 및 커플링등의 문제점 및 대책은 Magnet-Reed Switch 방식과 동일하다

다. 액체 침하계 방식

액체 침하계는 센서 설치를 위한 내/외관을 사용하지 않으므로 이에 관련되는 문제점은 없으나 그 특성상 다음과 같은 문제점이 발생할 수 있다.

- 1 개 시추공에 2 개 이상 액체 침하계 설치시의 문제

전술한 바와 같이 액체 침하계는 계측기와 지반의 상호간섭에 거의 완벽하게 순응할 수 있는 방식이다. 그러나 설치시 충분한 주의를 기울이지 않으면 매우 혼동스런 결과를 수반할 수 있다. 이중 가장 중요한 것중의 하나가 1 개 시추공에 설치하는 액체 침하계의 수량이다. 1 개 시추공에 설치되는 액체 침하계의 수는 1 개가 가장 이상적이다. 그러나 비용측면 등에서 1 개의 시추공에 2 개 이상 여러개의 액체침하계를 설치하는 경우가 있다. 이런 경우는 되도록 피하는 것이 좋으나, 여건상 불가결하다고 한다면 다음과 같은 조치를 취하는 것이 바람직하다.

① 본 시공보다 충분히 앞서 설치

이렇게 함으로서 액체 침하계가 설치된 시추공내의 되메움재가 안정되기를 기대한다. 되메움재가 충분히 안정된 후 본 시공이 진행된다면 되메움재의 불안정에 의한 급격한 침하등의 가능성은 줄어들 것이다. 대부분의 침하는 성토초기에 많이 발생하므로 침하계의 설치와 시공사이의 시간을 충분히 가지는 것이 좋다 (경험적으로 약 1 개월 정도)

② 액체 침하계의 Settlement Cell 의 스파이더 보강

1 개 시추공에 여러개의 액체 침하계를 설치하여야 하나 시공의 공기가 촉박하여 연속작업이 되어야 하는 경우는 액체 침하계 중의 Settlement Cell 의 몸체에 자석 - 리드 스위치 방식의 침하소자에 부착하는 거미발을 붙인다. 이렇게 함으로써, Settlement Cell 이 원지반에 잘 부착될 수 있도록 한다. 가능한 많은 수의 거미발이 바람직할 것이다 (6개).

- 액체 침하계의 기압보정

전기식 간극수압계를 이용한 대부분 액체 침하계의 경우 기압보정이 필수적이다. 기압보정 여하에 따라 20 cm 이상의 침하량 차가 발생하기도 한다. 이때 기압보정은 기압계를 이용하는 방안도 있으나, 현장에서 대기중에 간극수압계를 노출시키고 이때 온도보정을 거친후의 값이 "0" 이 아니고 얼마의 값을 가지면 그 값이 바로 기압보정치인 관계를 이용하는 간편한 방법도 있다.

- 액체 침하계를 이용한 신속한 침하량 변화

액체 침하계는 연결 튜브 내에 들어있는 액체를 이용한다. 따라서 신속한 침하 또는 Heaving 이 발생하는 경우 연결 튜브 내 액체의 Surging 이 발생하여 그 안정에 시간이 필요하게 된다. 예를 들어 연약지반상에 수직배수재 타설중 지반의 용기를 파악하는데 있어 나선형 침하봉 또는 자석 - 리드 스위치 방식들은 신뢰할 만한 결과를 제공하나, 액체 침하계는 분산이 심한 결과를 나타낸다. 따라서 신속한 침하변화량 측정등에서는 액체 침하계 측정 결과에 큰 신뢰도를 두어서는 않된다. 이러한 현상은 연결 튜브 내의 액체에 기포가 발생하였을 때 더욱 심하여 진다.

따라서 액체 침하계의 액체 튜브는 되도록 경질의 재료를 이용하여(내구성 등 다른 조건을 만족하는 범위 내에서) Surging 지속시간을 줄이고, 사용하는 액체는 기포가 잘 발생하지 않거나, 기포가 발생하더라도 이를 용해시킬 수 있는 액체를 사용하여야 한다 ("에" 용존공기를 제거한 액체를 사용).

- 주변 진동이 있을 경우의 액체 침하계 측정

액체 침하계 주위에 진동이 있을 경우 전술한 바와 같은 액체 튜브의 Surging 으로 말미암아 정확한 침하측정이 곤란하게 된다. 이때 액체 침하계의 간극수압계 에 작용하는 압력은 수직진동의 경우 작용하는 가속도만큼 커지게 되어 침하가 더 또는 덜 발생한 것처럼 나타난다. 이때 그 구체적 크기는 액체 튜브 의 강성, 기포의 량 등에 따라 다르게 나타날 것이다.

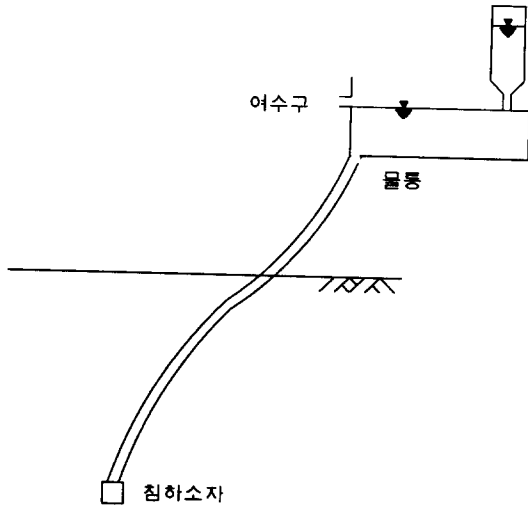
이런 경우에 대한 대책으로는 튜브를 보강하고 최대한 기포가 발생하지 않도록 하는 방법등이 있겠으나, 진동의 영향을 궁극적으로 차단할 수는 없다. 따라서 주변 진동이 있을 경우의 액체 침하계 측정은 진동의 영향이 없어지는 시간, 즉 야간을 택하여 계측을 수행하는 등의 방법을 적용하여야 한다.

- 장기간 계측시의 액체 증발 방지

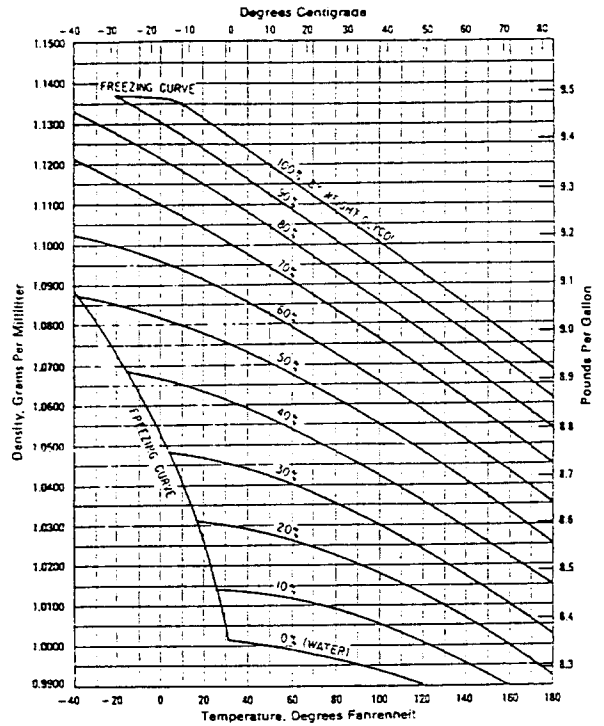
액체 침하계의 물통은 장기 계측시 액체의 증발에 의하여 수두가 변할 수 있다. 이런 경우를 대비하여 물통에 두껍을 달고 작은 구멍을 내어 놓는 방법이 있으며, 보다 효과적인 관리를 위하여는 <그림 8>과 같은 방식을 적용하는 것도 바람직하다.

- 액체 침하계 액체의 비중

액체 침하계에 사용하는 액체는 에틸렌 글리콜(자동차 부동액 성분), 수은 등이 사용된다. 그러나 수은은 그 독성으로 인하여 사용이 제한되는 경우가 많으므로 에틸렌 글리콜이 많이 사용된다. 그런데 에틸렌 글리콜은 <그림 9>와 같이 온도 및 물과의 혼합비율에 따라 밀도가 변하므로 간극수압계의 캘리브레이션 결과를 그대로 사용할 경우는 매우 주의 하여야 한다. 특히 현장에서 액체 침하계의 튜브내에 발생한 기포를 제거하기 위하여 액체를 교환할 경우 캘리브레이션 자체가 달라지게 되므로 <그림 9>를 이용한 신중한 캘리브레이션 팩터 검토가 필요하다.



<그림 8> 액체 침하계 물통의 일정 수두 유지 방법 (SCR 장치, 특허 신청중)



<그림 9> 액체 침하계용 액체의 밀도 변화 (Dow, 1981)

4. 결론 및 제언

본 고에서 토론된 침하측정기의 원리 및 문제점 그리고 대책 등을 요약하면 다음과 같다.

우리나라에서 주로 사용되고 있는 침하계는 갈고리 또는 나선형 침하봉, Bore Hole Extensometer, 액체 침하계 등이 있으며 각각 다음과 같은 특성이 있다.

- . 갈고리 또는 나선형 침하봉 : 가장 단순한 구조이나, 시공중 측정이 용이하지 않고, 시공중 측정결과의 오차가 크다
- . Bore Hole Extensometer : 갈고리 또는 나선형 침하봉과 비교하여 사용이 용이하나 시공중 측정은 유사한 정도로 용이하지 않다. 그러나 시공중 측정결과의 오차가 크지 않다. 케이싱과 주변지반의 상호간섭을 완전히 배제할 수 없다.
- . 액체 침하계 : 가장 발달된 구조이며, 시공중에도 측정이 지장 받지 않는다. 계측기와 지반의 상호작용이 거의 완전히 배제되나 구조가 복잡하여 충분한 이해가 필요하다.

또한 각 침하측정 방법별로 발생할 수 있는 주요 오류 가능성 및 이에 대한 대책을 요약하면 <표 2>와 같다.

상기의 내용은 계측기에 관한 문헌, 현장 기술자의 경험, 계측기 제작사의 국내외 기술진들과의 토의 등의 결과를 종합한 것으로서 계측기를 사용하는 토목기술자, 계측기를 설계하는 국내 제작기술자들을 위한 것으로서 이러한 사항들을 참고하여 보다 신뢰도 높은 계측이 이루어지고 보다 고성능의 계측기가 생산되길 바란다. 또한 본 고에서 검토된 계측기는 침하측정기의 전부는 아니며, 국내에서 많이 사용하고 있는 계측기를 주로 다루었다.

<표 2> 침하측정 방법의 주요 오류 발생 요인 및 대책

구 분	오류 발생 요인	대 책	
Magnet- Reed Switch 방식 또는 Current Inductio n Coil 방식	Sensor	Magnet-Reed Switch 방식의 케이싱이 휘었을 때 프로우브의 삽입 불가 문제	굴곡형 프로우브를 사용
		케이싱의 유격이 너무 커서 Magnet - Reed Switch 방식의 프로우브가 케이싱 내에서 표류할 때	되도록 굵은 프로우브를 사용
		액체 침하계의 센서와 측정기가 서로 다른 메이커일때	센서와 측정기의 Matching 여부를 신중히 검토
	침하소 자	Magnet-Reed Switch 방식에서 자석의 세기 및 배치로 인한 오류	되도록 세고 큰 자석을 사용 작은 자석을 여러개 사용할 때는 되도록 여러개를 사용하고, 극표정을 정확히 맞출 것
		Magnet-Reed Switch 방식에서 거미발의 종류	되도록 강성이 큰 스프링 강을 사용하여 앵커로서의 역할을 충실히 수행할 수 있도록 할 것 사용 재질은 부식이 되지 않는 것을 사용
		Magnet-Reed Switch 방식에서 고정점의 이동	나사못 등을 이용하여 고정점과 케이싱을 충실히 부착 고정점 주변 그라우팅 시 시험배합을 통하여 신뢰도 높은 그라우팅 실시 케이싱을 사용하여 시추하고 슬라임 청소를 철저히 시행
		Magnet-Reed Switch 방식에서 침하소자의 미끄러짐 또는 고착	충분한 시간 및 양호한 기상상태에서 침하계 설치공을 서두르지 않고 되메움하여 양질의 되메움 실시 시험배합을 거친 그라우트 재료를 Tremie Tube 를 이용하여 아래에서 위로 충전 침하소자가 설치후 설치공 내에서 미끄러져 떨어지지 않도록 충분히 큰 거미발 사용 침하소자 설치시 결속을 풀기가 용이한 줄 및 방법을 사용
	커플링 (공통)	커플링과의 마찰로 인한 프로우브 및 케이블의 손상	커플링의 끝단을 부드럽게 처리
		커플링 부위의 파손 또는 손상	(비)금속식 + 나사식 + 내부방식의 커플링 사용
		침하가 클 경우의 커플링 손상	연성 또는 Telescopic 커플링 사용
케이싱 (공통)	케이싱과 지반의 상호간섭으로 큰 침하량에 적응하기 곤란하여 발생하는 문제	지반의 침하량 범위를 고려하여 <표 1>의 방법을 선별사용 (2 중관 또는 연성 및 Telescopic 커플링 사용)	
	온도 및 기압차로 인한 오차	전기 저항식과 동일	
액체 침하계	1 개 시추공에 2 개이상 설치시의 문제	본 시공보다 충분히 먼저 시공하여 되메움재의 안정을 도모 침하소자의 몸체에 스파이더를 보강하여 침하소자가 지반에 단단히 고정되도록 조치	
	액체 침하계의 기압보정	기압계 또는 동등한 장비로 기압보정 실시	
	신속한 침하량 변화 측정시의 문제	원칙적으로 신속한 침하량 측정이 불가 경질의 튜브, 기포가 없는 액체 사용으로 반응시간을 최대한 단축	
	주변 진동이 있을 경우 계측의 신뢰도	진동이 없는 야간에 계측	
	장기간 계측시 액체 증발	큰 물통을 사용 SCR 장치 사용	

5. 참고문헌

Dow (1981), A Guide to Glycols, Dow Chemical USA, Organic Chemical Department, Midland, MI

Duncliff J., (1988), Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, "Wiley - Interscience Puvlication, John Wiley & Sons, pp 84, 87~116, 199~296, 348~357

Easton (1984), Experted from Duncliff(1988)

Geotechnical Instrument (1995), "Personnal Correspondence"

Hanna, T.H. 1985), "Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Trans Tech p.292

Selig, E.T. and Grangaard, H.O.(1970), "A new technique for soil strain measurement", Materials and Standards, 1970, Vol. 10, No. 11, pp.19~21

SINCO (1989), Brochures, (Pneumatic Piezometers)

SINCO (1994), Applications Guide, 2nd Ed.

SOIL INSTRUMENT, Product Catalogue for Magnetic Probe Extensometer

Toyoko Elmes (1996), "Personnal Correspondence"